

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penyusun telah melakukan telaah terhadap beberapa referensi yang ada, terdapat beberapa jurnal dan Tugas Akhir yang memiliki keterkaitan dengan pengamanan transformator menggunakan relai diferensial di monitor dengan HMI dilengkapi *data logger* berbasis Arduino Mega 2560. Meskipun dalam penyusunan dan penerapannya terdapat variasi kesamaan pada rumusan masalah, tujuan, maupun manfaat. Berikut kutipan pokok dari jurnal dan Tugas Akhir yang memiliki keterkaitan dengan tugas akhir penyusun.

Arduino Mega 2560 sebagai pusat pengendali alat mampu menyimulasikan proteksi diferensial sesuai daerah kerjanya. Hal ini sesuai dengan syarat sistem proteksi yaitu selektif, sehingga sistem proteksi dapat bekerja memisahkan bagian yang terganggu tanpa menyebabkan gangguan yang lebih luas dan hanya bekerja jika terjadi gangguan di daerah pengamanannya saja. Namun, alat tersebut belum dilengkapi dengan *Ampere Meter* dan *data logger* untuk merekam gangguan. ^[1]

Relai diferensial bekerja berdasar atas perbedaan arus dengan menggunakan prinsip Hukum Khirchoff 1 di mana arus yang masuk pada relai sama dengan arus yang keluar dari relai diferensial. ^[5]

$$\vec{I}_1 + \vec{I}_2 = 0 \dots \dots \dots [2.1]^{[5]}$$

Relai diferensial masih menggunakan *Ampere Meter* analog, sehingga sensitifitas pengukuran kurang baik. ^[5]

Memonitor pergeseran tanah yang direkam gejala-gejalanya dengan *data logger*, sehingga dapat dengan mudah dimonitor pergeseran tanahnya.^[6]

Perbedaan dengan beberapa referensi tersebut adalah penyusun membuat simulasi pengaman transformator yang dapat ditampilkan dan di-remote dengan HMI (*Human Machine Interface*), dengan memperhatikan kerja salah satu proteksi utama transformator yaitu relai diferensial. Alat simulasi ini akan mensimulasikan kerja dari relai diferensial terhadap gangguan internal. Simulasi pengaman transformator ini menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai otak kerjanya serta dilengkapi dengan *data logger* untuk merekam gangguan.

2.2 Sistem Transmisi Tenaga Listrik

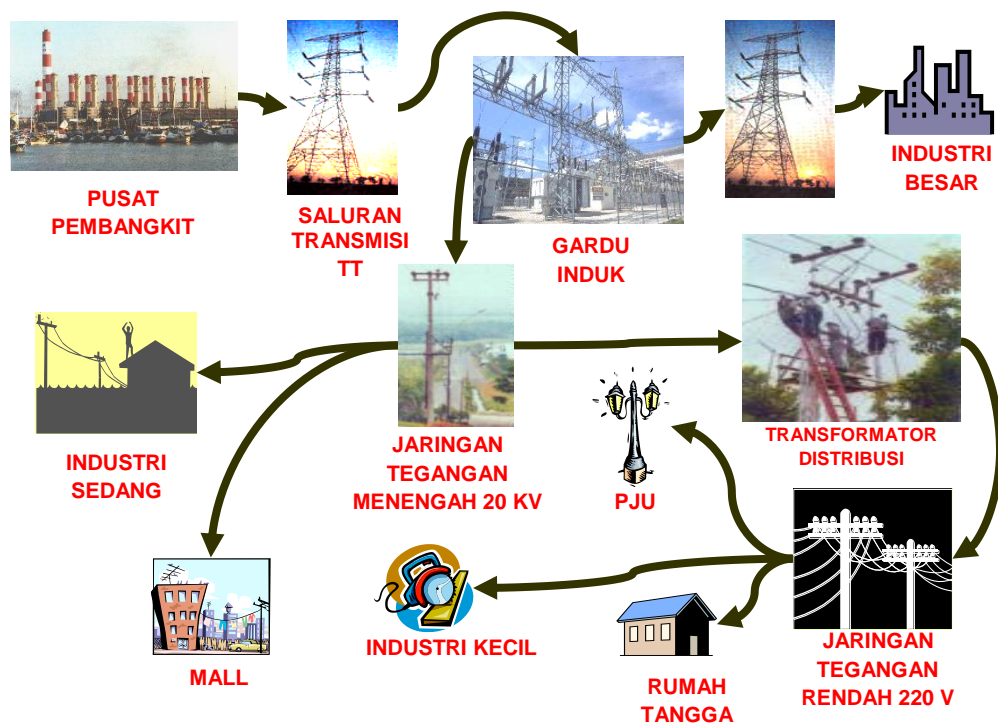
Pembangunan pusat Pembangkit dengan kapasitas produksi energi listrik yang besar: PLTA, PLTU, PLTGU, PLTG, PLTP memerlukan banyak persyaratan, terutama masalah lokasi yang tidak selalu bisa dekat dengan pusat beban seperti kota, kawasan industri dan lainnya. Akibatnya tenaga listrik tersebut harus disalurkan melalui sistem transmisi yaitu ^[5] :

1. Saluran Transmisi
2. Gardu Induk
3. Saluran Distribusi

Dari bagian-bagian sistem tenaga listrik di atas, yang termasuk dalam sistem transmisi adalah transformator daya, jaringan transmisi, dan gardu induk. Fungsi dari sistem transmisi adalah menyalurkan tenaga listrik ke pusat beban atau perusahaan-perusahaan pemakai tenaga listrik dalam jumlah besar. Sistem

transmisi yang biasa dipakai adalah saluran udara tegangan ekstra tinggi dan saluran udara tegangan tinggi. Pada sistem transmisi saluran udara, kawat-kawat digantung pada suatu tiang atau tower. ^[1]

Sistem penyaluran tenaga listrik mulai dari pusat pembangkit, sistem transmisi, hingga ke sistem distribusi merupakan satu kesatuan yang harus dapat bekerja baik. Bila salah satu bagian sistem mengalami keadaan yang tidak normal, maka akan mempengaruhi bagian sistem lain. ^[1]



Gambar 2.1 Skema sistem penyaluran tenaga listrik^[1]

2.3 Gardu Induk

Gardu induk adalah suatu instalasi yang terdiri dari sekumpulan peralatan listrik yang disusun menurut pola tertentu dengan pertimbangan teknis dan memiliki fungsi untuk menerima dan menyalurkan tenaga listrik melalui sistem

Tegangan Ekstra Tinggi (TET), Tegangan Tinggi (TT) dan Tegangan Menengah (TM).^[7]



Gambar 2.2 *Gardu Induk*

(Sumber : GI Temanggung pada tanggal 12 Maret 2018)

2.3.1 Fungsi Gardu Induk

Gardu Induk adalah suatu instalasi yang terdiri dari peralatan listrik tegangan tinggi yang mempunyai beberapa fungsi, di antaranya^[7]:

1. Mentransformasikan daya listrik dengan frekuensi tetap (50 *Hertz*):
 - a. Dari tegangan ekstra tinggi ke tegangan tinggi (500/150 kV)
 - b. Dari tegangan tinggi ke tegangan tinggi (150/70 kV)
 - c. Dari tegangan tinggi ke tegangan menengah (70/20 kV).
2. Untuk pengukuran, pengawasan operasi serta pengamanan dari sistem tenaga listrik.
3. Pengaturan pelayanan beban dari gardu induk ke gardu induk lain melalui tegangan tinggi dan ke gardu distribusi, setelah melalui proses penurunan

tegangan melalui penyulang-penyulang tegangan menengah yang ada di gardu induk.

4. Untuk sarana telekomunikasi (pada umumnya untuk internal PLN), yang biasa disebut dengan SCADA.

2.3.2 Jenis Gardu Induk

Gardu induk dapat dibedakan menjadi beberapa jenis, yaitu^[1]:

1. Berdasarkan besaran tegangannya :
 - a. Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) 275 kV dan 500 kV
 - b. Gardu Induk Tegangan Tinggi (GI) 150 kV dan 70 kV
2. Berdasarkan pemasangan peralatan :
 - a. Gardu Induk Pemasangan Luar (Konvensional)

Pada gardu induk ini peralatan instalasinya berisolasi udara bebas, karena sebagian besar peralatannya terpasang di luar gedung (*switchyard*) dan sebagian kecil berada di dalam gedung (*HV cell*, dll), sehingga memerlukan area tanah yang relatif luas.
 - b. Gardu Induk Pemasangan Dalam

Pada gardu induk ini hampir semua peralatannya berisolasi gas SF₆, karena sebagian besar peralatannya terpasang di dalam gedung dan dikemas dalam tabung, sehingga memerlukan area tanah yang jauh lebih kecil.
3. Berdasarkan isolasi yang digunakan :
 - a. Gardu induk dengan isolasi udara, yaitu gardu induk yang menggunakan isolasi udara antara bagian bertegangan yang satu dengan bagian

bertegangan lainnya. Gambar 2.3 merupakan contoh gardu induk isolasi udara.



Gambar 2.3 Gardu Induk berisolasi Udara
(Sumber : GI Temanggung pada tanggal 12 Maret 2018)

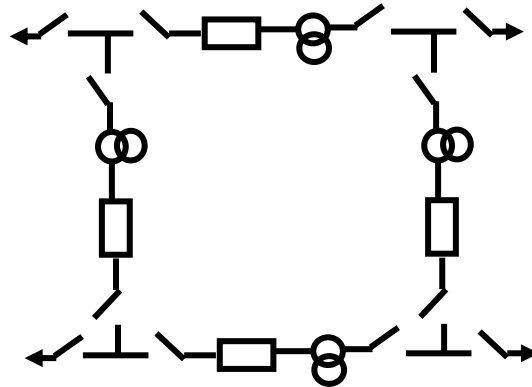
- b. Gardu induk dengan isolasi gas SF_6 , yaitu gardu induk yang menggunakan gas SF_6 sebagai isolasi antara bagian bertegangan yang satu dengan bagian bertegangan lain maupun antara bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan. Contoh gardu induk dengan isolasi gas SF_6 ada pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Gardu Induk Berisolasi SF_6 ^[8]

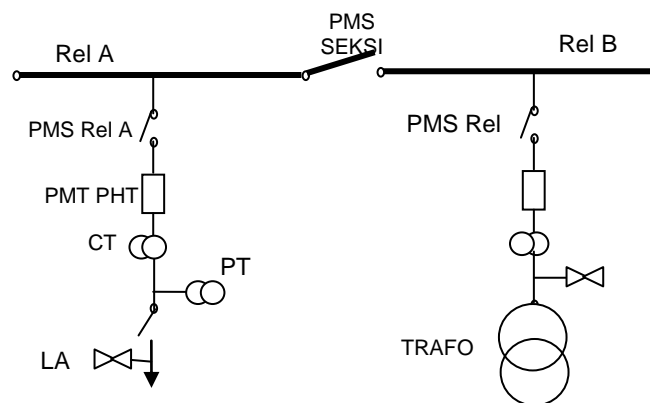
4. Berdasarkan sistem rel (*busbar*):
 - a. Gardu induk sistem *ring busbar*, yaitu gardu induk yang relnya berbentuk *ring*. Pada gardu induk jenis ini, semua rel (*busbar*) yang ada

tersambung/terhubung satu dengan lainnya. *Single line* gardu induk sistem *ring busbar* ada pada gambar 2.5.



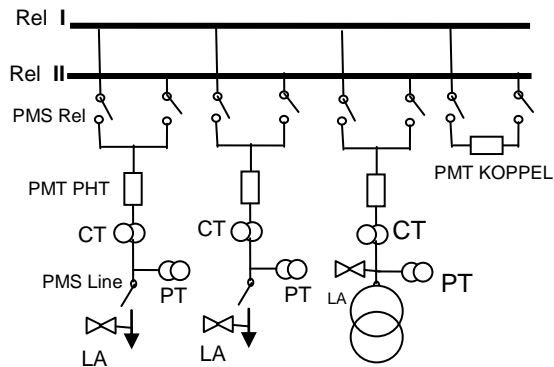
Gambar 2.5 *Single Line Gardu Induk Sistem Ring Busbar*^[9]

- b. Gardu induk sistem *single busbar*, adalah gardu induk yang mempunyai satu (*single*) busbar. Gambar 2.6 merupakan *single line* gardu induk sistem *single busbar*.



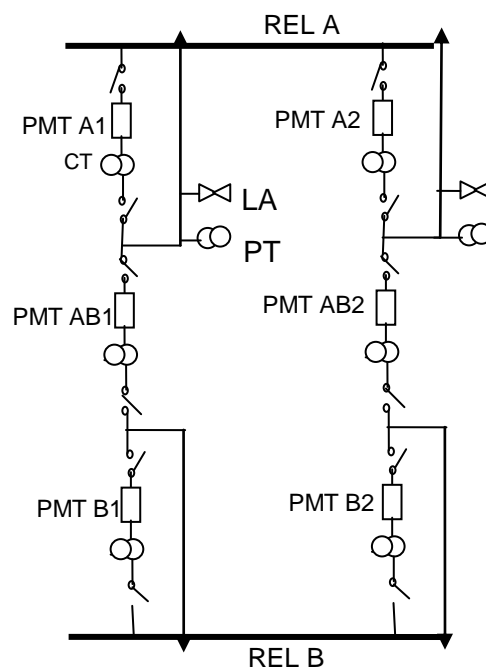
Gambar 2.6 *Single Line Gardu Induk Sistem Single Busbar*^[9]

- c. Gardu induk sistem *double busbar*, adalah gardu induk yang mempunyai dua busbar. Gardu induk dengan sistem *double busbar* sangat efektif untuk mengurangi terjadinya pemadaman beban. Gambar 2.7 merupakan *single line* gardu induk sistem *double busbar*.



Gambar 2.7 Single Line Gardu Induk Sistem Double Busbar^[9]

- d. Gardu induk sistem satu setengah (*one half*) *breaker*, adalah gardu induk yang mempunyai dua busbar dengan 3 PMT pada setiap diameter. Gardu induk pembangkitan dan gardu induk yang sangat besar menggunakan sistem ini, karena sangat efektif dalam segi operasional dan dapat mengurangi pemadaman beban pada saat melakukan perubahan sistem (*manuver system*).



Gambar 2.8 Single Line Gardu Induk Satu Setengah Busbar^[9]

2.3.3 Komponen Utama Gardu Induk

Komponen-komponen yang terdapat pada gardu induk adalah sebagai berikut :

1. Serandang (*Switchyard/Switchgear*)

Serandang adalah kumpulan beberapa komponen yang terpasang di gardu induk konvensional, yang berfungsi sebagai terminal yang menghubungkan antara peralatan satu dengan peralatan yang lainnya pada gardu induk tegangan tinggi atau tegangan ekstra tinggi sebagai penyaluran sistem tenaga listrik. ^[9]

2. Transformator

a. Transformator Tenaga

Transformator tenaga adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Dalam operasi penyaluran tenaga listrik transformator dapat dikatakan sebagai jantung dari transmisi dan distribusi. Dalam kondisi ini suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal. ^[2]

b. Transformator *Instrument*/Pengukuran

- Transformator Arus (*Current Transformer/CT*)

Transformator arus adalah peralatan yang digunakan untuk melakukan pengukuran besaran arus pada instalasi tenaga listrik di sisi primer (TET, TT dan TM) yang berskala besar dengan melakukan transformasi dari besaran arus yang besar menjadi besaran arus yang

kecil secara akurat dan teliti untuk keperluan pengukuran dan proteksi.

[11]

- Transformator Tegangan (*Potential Transformer/PT*)

Transformator tegangan adalah peralatan yang mentransformasi tegangan sistem yang lebih tinggi ke suatu tegangan sistem yang lebih rendah untuk kebutuhan peralatan indikator, alat ukur/meter dan relai proteksi. [12]

3. Pemutus Tenaga/PMT (*Circuit Breaker/CB*)

PMT adalah peralatan saklar/*switching* mekanis yang mampu menutup, mengalirkan, dan memutus arus beban dalam kondisi normal, serta mampu menutup, mengalirkan (dalam periode waktu tertentu), dan memutus arus beban dalam kondisi *abnormal*/gangguan seperti kondisi hubung singkat (*short circuit*). [13]

4. Pemisah/PMS (*Disconnecting Switch/DS*)

PMS adalah suatu peralatan sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai saklar pemisah rangkaian listrik dalam kondisi bertegangan atau tidak bertegangan tanpa arus beban. [14]

5. Rel Daya (*Busbar*)

Rel daya (*busbar*) merupakan titik penghubung antara transformator daya dan SUTT/ SKTT dengan komponen listrik lainnya, untuk menerima dan menyalurkan tenaga listrik. [15]

6. Isolator

Isolator mengisolasi bagian yang bertegangan dengan *ground* dan mengisolasi penghantar antar fasa. Isolator padat secara mekanis menahan beban tarikan atau tumpu konduktor (*tensile strength*) saluran transmisi.^[16]

7. *Lightning Arrester* (LA)

Lightning Arrester (LA) merupakan peralatan yang berfungsi untuk melindungi peralatan listrik lain dari tegangan surja (baik surja hubung maupun surja petir).^[17]

8. *Wave Trap*

Wave Trap berfungsi sebagai filter frekuensi pembawa PLC agar tidak masuk ke sistem peralatan jaringan tegangan tinggi dalam gardu induk. Sebaliknya, *Wave Trap* harus mampu menyalurkan arus listrik yang tinggi sesuai kebutuhan penyaluran daya pada sistem jaringan tersebut.^[18]

9. Panel Kontrol

Panel kontrol berfungsi untuk mengetahui dan mengontrol kondisi gardu induk sebagai pusat pengendali lokal gardu induk. Di dalam panel kontrol terdiri atas komponen- komponen di dalamnya di antaranya^[19]:

- a. Saklar
- b. Indikator- indikator
- c. Tombol- tombol komando operasi PMT
- d. Tombol- tombol komando operasi PMS
- e. Alat ukur besaran listrik
- f. *Annouciator*

10. Sumber DC

Sumber tenaga untuk kontrol (sumber DC) selalu harus mempunyai keandalan dan stabilitas yang tinggi. Karena persyaratan inilah dipakai baterai sebagai sumber arus searah. Catu daya sumber DC digunakan untuk kebutuhan operasi relay proteksi, kontrol dan scadatel. Untuk kebutuhan operasi relay dan kontrol di PLN terdapat dua sistem catu daya pasokan arus searah yaitu DC 110V dan DC 220V, sedangkan untuk kebutuhan scadatel menggunakan sistem catu daya DC 48V. Catu daya DC bersumber dari *rectifier* dan baterai. Terpasang pada instalasi secara paralel dengan beban, sehingga dalam operasionalnya disebut sistem DC. ^[20]

11. Trafo Bantu (*Auxiliary Trafo*)

Trafo bantu sering disebut juga trafo pemakaian sendiri karena fungsinya sebagai pemasok perlatan dan sumber atau penyimpan arus DC. Fungsi yang paling utama trafo bantu adalah sebagai pasokan sumber tenaga yang arusnya DC cadangan jika terjadi gangguan pada titik tertentu dan tidak ada pasokan arus AC maka trafo bantu tetap berkerja dengan optimal.

Diperlukan pembagi sumber DC untuk setiap fungsi dan *bay* yang menggunakan sumber DC dan untuk setiap gardu induk harus memiliki panel distribusi AC dan DC. ^[19]

2.4 Gangguan pada Transformator

Daerah pengaman relai diferensial dibatasi oleh letak CT (*Current Transformer*). Relai diferensial hanya akan bekerja pada gangguan internal transformator saja.

1. Gangguan Eksternal Transformator

Gangguan eksternal transformator daya ini sering terjadi dan dapat merupakan beban lebih, hubung singkat satu fasa ke tanah maupun gangguan antar fasa. Gangguan pada daerah ini mempunyai pengaruh terhadap transformator, sehingga transformator harus dilepaskan/dipisahkan bila gangguan tersebut terjadi setelah waktu tertentu untuk memberi kesempatan pengamanan daerah yang terganggu bekerja. Kondisi beban lebih yang berlanjut dapat dideteksi dengan relai *thermal* atau thermometer yang memberi sinyal sehingga dapat mengatur ataupun mengadakan manipulasi jaringan sehingga beban berkurang tetapi bila perlu diputuskan suplainya.

Untuk kondisi gangguan eksternal misalnya gangguan hubung singkat pada rel atau gangguan hubung singkat di saluran keluaranya, maka relai arus lebih dengan perlambatan waktu atau sekering digunakan sebagai pengamannya. Koordinasi yang baik untuk pengaman cadangan transformator ini perlu diciptakan terhadap pengaman daerah berikutnya yang terkait. Pengaman utama dari transformator ini dibuat semedikian rupa sehingga tidak boleh bekerja terhadap gangguan tersebut di atas.

2. Gangguan Internal Transformator

Relai diferensial akan bekerja apabila terjadi gangguan internal transformator. Gangguan internal transformator bisa sangat serius dan selalu ada resiko terjadinya kebakaran, gangguan internal dapat digolongkan menjadi dua kelompok, yaitu:

a. Kelompok A

Gangguan listrik akan dengan segera menyebabkan kerusakan yang serius tetapi pada umumnya dapat dideteksi oleh adanya arus atau tegangan yang tidak seimbang, di antaranya :

- Gangguan satu fasa atau antar fasa pada sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah di terminal luar.
- Gangguan satu fasa atau antar fasa pada lilitan sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah. Hubung singkat antar lilitan di sisi tegangan tinggi atau tegangan rendah.
- Gangguan tanah pada lilitan tersier, atau hubung singkat antar belitan di lilitan tersier.

b. Kelompok B

Suatu gangguan yang dimulai gangguan yang kecil atau tidak berarti, namun secara lambat akan menimbulkan kerusakan, gangguan ini tidak dapat dideteksi adanya tegangan atau bertambah besarnya arus pada ujung lilitan.

- Sambungan secara elektrik dari konduktor jelek dan gangguan inti misalnya tembusnya lapisan isolasi inti serta baut atau ring klem

kurang kencang, yang akan menimbulkan busur yang terbatas pada minyak.

- Gangguan sistem pendingin, yang akan menyebabkan pemanasan lebih walaupun bebannya belum mencapai nominal. Sehubungan butir 2 adalah kemungkinan kurang minyak atau tersumbatnya aliran minyak sehingga menimbulkan pemanasan setempat pada lilitan.
- Gangguan dari pengatur tegangan dan pembagian beban yang tidak baik antara transformator yang bekerja paralel, yang akan menyebabkan pemanasan lebih karena adanya arus sirkulasi.

2.5 Proteksi Transformator

Gangguan internal, transformator memiliki proteksi mekanik dan proteksi elektrik, sedangkan untuk gangguan eksternal transformator hanya memiliki proteksi elektrik. ^[3]

2.5.1 Proteksi Terhadap Transformator

Proteksi transformator tenaga umumnya menggunakan relai diferensial dan relai *Restricted Earth Fault* (REF) sebagai proteksi utama. Sedangkan proteksi cadangan menggunakan *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR). Sedangkan *Standby Earth Fault* (SBEF) umumnya hanya dipergunakan pada transformator dengan belitan Y yang ditanahkan dengan resistor, dan fungsinya lebih mengamankan *Neutral Grounding Resistance* (NGR). ^[3] Fungsi sistem pengamanan, yaitu ^[1]:

1. Memisahkan bagian sistem yang mengalami gangguan dari bagian sistem

yang masih beroperasi, dengan cara relai memerintahkan *trip* kepada pemutus tenaga (PMT).

2. Merasakan dan menentukan bagian sistem yang sedang mengalami gangguan serta memisahkan secepat mungkin, sehingga sistem lain yang tidak terganggu dapat beroperasi secara normal.
3. Mengurangi dampak bahaya bagi manusia.
4. Mengurangi dampak kerusakan yang lebih parah dari peralatan yang mengalami gangguan.

Transformator sebagai salah satu komponen penting pada sebuah gardu induk memerlukan pengamanan seperti komponen-komponen lain, agar jika terjadi gangguan, maka gangguan tersebut tidak merusak peralatan dan mengganggu sistem kerja komponen lain. ^[1]

2.5.1.1 Proteksi Utama Transformator

Proteksi utama adalah sistem proteksi yang diharapkan sebagai prioritas pengamanan gangguan atau menghilangkan kondisi tidak normal pada transformator. Proteksi ini dimaksudkan untuk pengaman pertama saat terjadinya gangguan dalam kawasan yang harus dilindungi. Ciri-ciri pengaman utama:

- Waktu kerjanya cepat (*instantaneous*).
- Tidak dapat dikoordinasikan dan tidak bergantung pada proteksi lain.
- Daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan *CT*.

Proteksi utama transformator tenaga umumnya menggunakan relai diferensial dan relai *Restricted Earth Fault* (REF).^[1]

1. Relai Diferensial

Relay diferensial berfungsi melindungi transformator terhadap gangguan dari dalam (internal) transformator tersebut. Apabila terjadi gangguan dalam transformator, maka timbul selisih antara arus yang masuk dan keluar dari transformator bersangkutan dan selisih arus inilah yang mengoperasikan relai diferensial ini.^[21]

2. *Restricted Earth Fault (REF)*

Restricted Earth Fault (REF) merupakan salah satu proteksi utama transformator/reaktor yang prinsip kerjanya sama dengan relai diferensial, perbedaannya *Restricted Earth Fault (REF)* dipergunakan untuk pengamanan transformator/reaktor terhadap gangguan fasa – tanah, khususnya yang dekat dengan titik bintang transformator/reaktor. Relai ini dipasang pada belitan transformator/reaktor dengan konfigurasi Y yang ditanahkan.^[1]

2.5.1.2 Proteksi Cadangan Transformator

Proteksi cadangan adalah suatu sistem proteksi yang dirancang untuk bekerja ketika terjadi gangguan pada sistem, tetapi tidak dapat diamankan atau tidak terdeteksi dalam kurun waktu tertentu, karena kerusakan atau ketidakmampuan proteksi yang lain (proteksi utama).

1. *Over Current Relay (OCR)*

Rele ini berfungsi melindungi transformator terhadap arus lebih yang terjadi karena pembebanan yang berlebihan atau ada gangguan hubung singkat antar fasa di luar maupun di dalam transformator.^[21]

2. **Ground Fault Relay (GFR)**

Ground Fault Relay (GFR) pada dasarnya mempunyai prinsip kerja yang sama dengan relai arus lebih (OCR) namun memiliki perbedaan dalam kegunaannya. GFR mendeteksi melalui binary input yang ada pada relai, sehingga memerintahkan *binary output*, agar memberikan perintah jika adanya hubungan singkat ke tanah. [22]

3. **Stand By Earth Fault (SBEF)**

Stand By Earth Fault (SBEF) merupakan proteksi NGR terhadap arus lebih yang berfungsi untuk mengamankan NGR dari hubung singkat fase tanah. Oleh karena itu SBEF hanya ada pada transformator yang pentanahannya menggunakan NGR. SBEF ini juga harus dikoordinasikan dengan relai GFR. SBEF harus bekerja paling akhir sebagai pengaman NGR. [3]

4. **Over dan Under Voltage Relay (OVR dan UVR)**

Over dan Under Voltage Relay (OVR dan UVR) adalah relai yang dirancang untuk mengamankan sistem dari pengaruh tegangan lebih atau tegangan kurang. *OVR* bekerja jika nilai tegangan naik melebihi dari *setting*, sedangkan *UVR* bekerja jika nilai tegangan turun kurang dari nilai *setting*. [1]

2.5.2 **Syarat Sistem Proteksi**

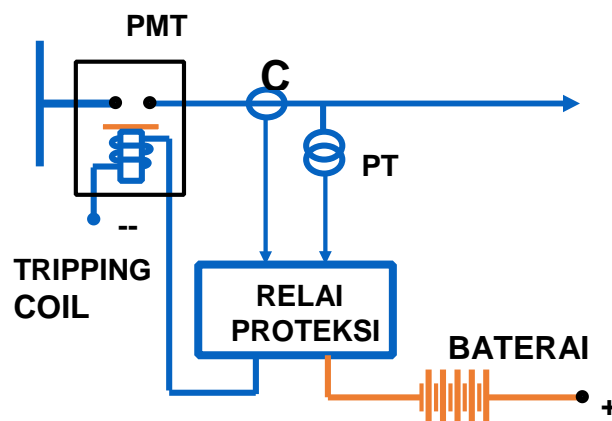
Suatu relai proteksi harus memiliki beberapa syarat-syarat [21]:

- a. Sistem proteksi harus selektif dalam memilih dengan tepat bagaimana dari instalasi yang terganggu dan harus dipisahkan dari rangkaian yang tidak terganggu dan harus beroperasi terus

- b. Sensitif : sistem proteksi harus perlu memiliki suatu tingkat sensitifitas tinggi, agar gangguan dapat terdeteksi sedini mungkin sehingga bagian yang terganggu atau terjadinya kerusakan menjadi sekecil mungkin
- c. Andal : sistem proteksi perlu memiliki suatu taraf keandalan yang tinggi, dan senantiasa dapat bekerja pada kondisi – kondisi gangguan yang terjadi.
- d. Cepat : sistem proteksi perlu memiliki tingkat kecepatan sebagaimana ditentukan, sehingga meningkatkan waktu pelayanan, keamanan manusia dan peralatan serta stabilitas operasi.

2.5.3 Perangkat Sistem Proteksi

Sistem proteksi terdiri dari peralatan CT, PT/CVT, PMT, catu daya, relai proteksi, dan teleproteksi yang diintegrasikan dalam suatu rangkaian pengawatan.¹¹ Gambar 2.9 berikut menunjukkan perangkat-perangkat sistem proteksi.



Gambar 2.9 Perangkat Sistem Proteksi^[1]

1. CT/PT

Transformator arus maupun tegangan adalah transformator yang digunakan untuk menurunkan nilai arus/tegangan di bagian sekunder, yang

akan masuk ke relai. Pada sistem proteksi, *CT/PT* berfungsi sebagai alat pengindera. Masing-masing relai memiliki jenis masukan yang berbeda sesuai dengan kebutuhan.

2. Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker/CB*)

Pemutus Tenaga (*Circuit Breaker/CB*) berfungsi untuk memisahkan/menghubungkan satu bagian jaringan dengan bagian lain, baik dalam keadaan normal maupun saat terjadi gangguan.

3. Relai

Relai sebagai peralatan yang berperan untuk mendeteksi adanya gangguan, selanjutnya relai memberi perintah *open* kepada PMT. Relai mendapatkan nilai masukan dari *CT/PT*. Relai akan di-*setting* sesuai dengan kebutuhan dari *user*, sehingga antara satu relai dengan relai yang lainnya akan memiliki nilai *setting* berbeda.

4. Pengawatan (*Wiring*)

Pengawatan (*wiring*) merupakan rangkaian/hubungan antara peralatan satu dengan yang lain, sehingga menjadi suatu rangkaian diagram. Pengawatan proteksi (AC Diagram) merupakan rangkaian peralatan-peralatan proteksi melalui kabel sebagai interkoneksi. Sedangkan pengawatan kontrol (DC Diagram) merupakan rangkaian dari bagian relai (kontak-kontak relai) dan relai bantu yang mendapat *input* catu daya DC.

5. *Tripping Coil*

Tripping coil merupakan rangkaian untuk men-*trip*-kan suatu PMT. Di dalam sebuah PMT terdapat motor penggerak yang bekerja ketika PMT

open/close. Sebelum melakukan kerja, motor penggerak mendapatkan *trigger* atau rangsangan dari rangkaian *tripping*-nya. *Tripping coil* harus dipastikan dapat bekerja dengan baik, sebab jika terjadi kemacetan, maka PMT juga tidak akan bekerja sesuai perintah.

6. *Master Trip*

Master trip merupakan sistem yang melanjutkan perintah *trip*, dari beberapa relai ke *tripping coil*.

7. *Supply DC*

Baterai beserta alat pengisi (*charger*) digunakan sebagai sumber tenaga untuk bekerjanya relai dan peralatan bantu *tripping*.

2.6 Relai Diferensial

Relai diferensial berfungsi melindungi transformator terhadap gangguan daari dalam (internal) transformator tersebut. Apabila terjadi gangguan dalam transformator , maka timbul selisih antara arus yang masuk dan keluar dari transformator bersangkutan dan selisih arus inilah yang mengoperasikan relai diferensial ini.^[21]

2.6.1 Prinsip Kerja Relai Diferensial

Rele diferensial bekerja dengan membandingkan arus yang masuk keluar. Ketika terjadi perbedaan maka relai akan mendeteksi adanya gangguan dan menginstruksikan PMT untuk membuka (*trip*) apabila terjadi perbedaan. Perbedaan di sini adalah perbedaan nilai arus dan perbedaan besar fasa (stabilitas arus). Rele ini lebih efektif untuk menangani gangguan internal transformator.^[23]

Rele diferensial bekerja tanpa koordinasi dengan rele yang lain, sehingga kerja rele ini memerlukan waktu yang cepat. Berbeda dengan sifat rele yang lain, rele ini bersifat sangat selektif. Sifat selektif yang dimaksud adalah rele diferensial tidak akan bekerja pada saat normal atau gangguan di luar daerah pengamanan. Rele ini juga tidak dapat dijadikan sebagai pengamanan cadangan dan rele ini memiliki daerah pengamanan yang dibatasi oleh trafo arus (CT).^[23]

Prinsip kerja relai diferensial adalah membandingkan dua vektor arus atau lebih yang masuk ke relai. Prinsip ini berdasarkan pada Hukum *Khirchoff* 1, yaitu jumlah arus masuk I_1 harus sama dengan arus yang keluar dari I_2 atau sebaliknya.^[1]

$$I_{diferensial} = I_d = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 \dots \dots \dots (1)^{[24]}$$

Dengan saat keadaan normal/tidak terjadi gangguan:

$$I_{diferensial} = I_d = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 = 0 \rightarrow I_1 = I_2 \dots \dots \dots (2)^{[24]}$$

Di mana:

I_d = Nilai arus diferensial

I_1 = Nilai arus sekunder CT 1

I_2 = Nilai arus sekunder CT 2

Namun akan ada beberapa hal yang mengakibatkan nilai I_d bernilai tidak sama dengan nol, namun bukan karena gangguan internal transformator sehingga terdapat arus setting yang bernilai 0,3 A seperti yang ditunjukkan pada perhitungan matematis di bawah ini yang terdapat pada transformator daya dengan kapasitas 16 MVA dan menurunkan tegangan dari 150 kV ke 22 kV.

a) Perhitungan rasio CT

Perhitungan arus *rating* menggunakan rumus :

$$I_{rating} = 110\% \times I_{nominal}$$

Dimana :

$$I_{nominal} = I = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$

I_n = Arus Nominal (A)

S = Daya Tersalur (MVA)

V = Tegangan pada sisi primer dan sekunder (kV)

I_n atau arus nominal merupakan arus yang mengalir pada masing-masing jaringan (tegangan tinggi dan tegangan rendah).

Arus nominal tegangan tinggi 150 kV :

$$I_n = \frac{16.000.000}{\sqrt{3} \times 150.000}$$

$$I_n = 61,59 \text{ A}$$

Arus nominal tegangan rendah 22 kV :

$$I_n = \frac{16.000.000}{\sqrt{3} \times 22.000}$$

$$I_n = 418,89 \text{ A}$$

I_{rating} untuk tegangan tinggi 150 kV :

$$I_{rat} = 110\% \times 61,59 \text{ A}$$

$$I_{rat} = 67,749 \text{ A}$$

I_{rating} untuk tegangan rendah 22 kV:

$$I_{rat} = 110\% \times 419,89 \text{ A}$$

$$I_{rat} = 461,879 \text{ A}$$

Hasil dari perhitungan arus nominal yang mengalir pada trafo sisi tegangan tinggi 150 kv sebesar 61,59 A dan di sisi tegangan rendah 22 kv sebesar 419,89 A. Nilai arus *rating* pada sisi tegangan tinggi 150 kv sebesar 67,749 A dan di sisi tegangan rendah 22 kv sebesar 461,879 A. Berdasarkan dari hasil perhitungan, maka rasio CT yang dipilih pada sisi tegangan tinggi adalah 75:1 A dan untuk rasio CT pada sisi tegangan rendah dipilih 800:1 A. Maksud dari rasio yang dipilih adalah, apabila pada trafo sisi tegangan tinggi mengalir arus sebesar 75 A maka pada CT tersebut terbaca 1 A. Hal ini berlaku juga pada CT yang dipasang pada trafo di sisi tegangan rendah. Rasio CT dipilih 75 A dan 800 A karena nilai tersebut mendekati nilai *rating* arus yang telah dihitung dan CT dengan rasio tersebut ada di pasaran.

b) *Error mismatch*

Error mismatch merupakan kesalahan dalam membaca perbedaan arus dan tegangan di sisi primer dan sekunder transformator serta pergeseran fasa di trafo tersebut. Menghitung besarnya arus mismatch yaitu dengan cara membandingkan rasio CT ideal dengan CT yang ada di pasaran, dengan ketentuan *error* tidak boleh melebihi 5% dari rasio CT yang dipilih. Perhitungan besarnya *mismatch* menggunakan rumus :

$$Error\ Mismatch = \frac{CT\ Ideal}{CT\ Terpasang} \%$$

Dimana :

$$\frac{CT_2}{CT_1} = \frac{V_1}{V_2}$$

CT (Ideal) = trafo arus ideal

V_1 = tegangan sisi tinggi

V_2 = tegangan sisi rendah

Error Mismatch di sisi tegangan tinggi 150 kv :

$$CT_1(Ideal) = CT_2 \times \frac{V_2}{V_1}$$

$$CT_1(Ideal) = \frac{800}{1} \times \frac{22}{150}$$

$$CT_1(Ideal) = 117,3 A$$

$$Error Mismatch = 1,56 \%$$

Error Mismatch di sisi tegangan tinggi 22 kv :

$$CT_2(Ideal) = CT_1 \times \frac{V_1}{V_2}$$

$$CT_1(Ideal) = \frac{75}{1} \times \frac{150}{22}$$

$$CT_1(Ideal) = 511,36 A$$

$$Error Mismatch = 0,63 \%$$

Hasil dari perhitungan yang telah dilakukan, maka diperoleh nilai CT_1 ideal sebesar 117,3 A dan *error mismatch* sebesar 1,56%. *Error mismatch* pada CT_2 sebesar 0,63% dengan hasil perhitungan CT ideal sebesar 511,16 A. Demikian didapatkan nilai selisih antara trafo arus terpasang dan trafo arus ideal sebesar 42,3 A pada sisi tegangan tinggi dan 288,64 A pada sisi tegangan rendah.

c) Arus Sekunder CT

Arus sekunder CT merupakan arus yang dikeluarkan CT.

$$I_{Sekunder} = \frac{1}{rasio CT} \times I_n$$

Arus sekunder CT sisi tegangan tinggi 150 kV

$$I_{\text{Sekunder}} = \frac{1}{75} \times 61,59 \text{ A}$$

$$I_{\text{Sekunder}} = 0,82 \text{ A}$$

Arus sekunder CT sisi tegangan rendah 22 kV.

$$I_{\text{Sekunder}} = \frac{1}{800} \times 419,89 \text{ A}$$

$$I_{\text{Sekunder}} = 0,524 \text{ A}$$

d) Arus diferensial

Arus diferensial merupakan arus selisih antara arus sekunder CT sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah. Rumus untuk menentukan arus diferensial yaitu :

$$I_{\text{dif}} = I_2 - I_1$$

Dimana :

I_{diff} = Arus Diferensial

I_1 = Arus Sekunder CT₁

I_2 = Arus Sekunder CT₂

Perhitungan arus diferensial :

$$I_{\text{diff}} = 0,524 \text{ A} - 0,821 \text{ A}$$

$$I_{\text{diff}} = -0,296 \text{ A}$$

$$I_{\text{diff}} = 0,296 \text{ A}$$

Selisih antara I_{sek} CT₁ dan CT₂ yaitu sebesar 0,296 A. Selisih inilah yang nanti akan dibandingkan dengan arus setting rele diferensial.

e) Arus *Restrained*

Arus *restrain* diperoleh dengan cara menjumlahkan arus sekunder CT₁ dan CT₂ kemudian dibagi 2. Rumus yang digunakan untuk menghitung arus *restrain* yaitu :

$$I_r = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

Dimana:

I_r = Arus penahan (A)

I_1 = Arus sekunder CT₁ (A)

I_2 = Arus sekunder CT₂ (A)

Maka :

$$I_r = \frac{0,82 A + 0,524 A}{2}$$

$$I_r = 0,672 A$$

Arus *restrain* yang didapat dari hasil perhitungan adalah 0,672 A. Ketika arus diferensial naik akibat perubahan rasio di sisi tegangan tinggi dan tegangan rendah yang disebabkan oleh perubahan tap trafo daya maka arus *restrain* ini juga akan naik. Hal ini berguna agar rele diferensial tidak bekerja karena bukan merupakan gangguan.

f) ***Percent Slope (setting kecuraman)***

Slope didapat dengan cara membagi antara arus diferensial dengan arus *restrain*. *Slope 1* akan menentukan arus diferensial dan arus *restrain* pada saat kondisi normal dan memastikan sensitifitas rele pada saat gangguan internal dengan arus gangguan yang kecil, sedangkan *slope 2* berguna supaya rele diferensial tidak bekerja oleh gangguan eksternal dengan arus gangguan yang besar sehingga salah satu CT mengalami saturasi (Fransiscus Sihombing, 2012)

Rumus yang digunakan untuk mencari % *slope 1* dan % *slope 2* yaitu :

$$Slope_1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\%$$

$$Slope_2 = \left(\frac{I_d}{I_r} \times 2 \right) \times 100\%$$

Dimana :

$Slope_1$: *setting* kecuraman 1

$Slope_2$: *setting* kecuraman 2

I_d : Arus Diferensial (A)

I_r : Arus *Restrain* (A)

Menghitung *slope* 1 :

$$Slope_1 = \frac{0,296 A}{0,672 A} \times 100\%$$

$$Slope_1 = 44\%$$

Menghitung *slope* 2 :

$$Slope_2 = \left(\frac{0,296 A}{0,672 A} \times 2 \right) \times 100\%$$

$$Slope_2 = 88\%$$

Hasil yang didapat dari perhitungan yaitu *slope* 1 sebesar 44% dan *slope* 2 sebesar 88%.

g) Arus *setting* (I_{set})

Arus *setting* didapat dengan mengalikan antara *slope* dan arus *restrain*. Arus *setting* inilah yang nanti akan dibandingkan dengan arus diferensial. Rumus matematis I_{set} :

$$I_{set} = \%Slope \times I_{restrain}$$

Dimana :

I_{set} : Arus *Setting*

% *slope* : *Setting* Kecuraman (%)

$I_{restrain}$: Arus Penahan

$$I_{set} = 44\% \times 0,672 A$$

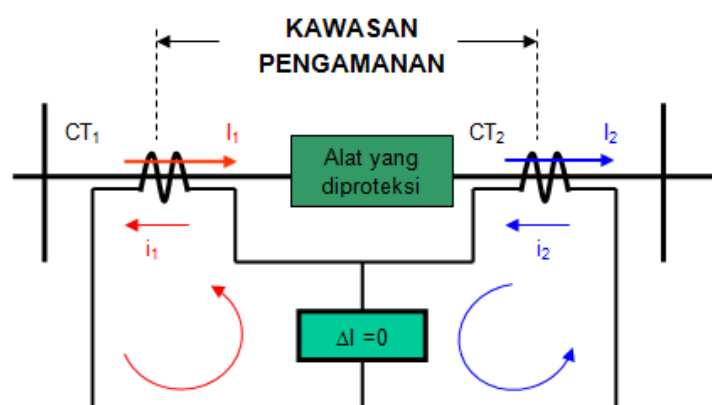
$$I_{set} = 0,44 \times 0,672 A$$

$$I_{set} = 0,295 A$$

Arus *setting* yang diperoleh dari hasil perhitungan adalah 0,295A, namun *setting* yang dibuat adalah 0,3 A atau 30% dengan pertimbangan yaitu : kesalahan sadapan (10%), kesalahan CT (10%), *mismatch* (4%), arus eksitasi (1%) dan faktor keamanan (5%).

Agar nilai arus yang mengalir pada relai diferensial 0, maka jumlah arus yang mengalir pada kedua CT haruslah bernilai sama dengan perbedaan sudut sebesar 180°. Jika pada sisi primer transformator arus (CT_1) dialiri arus I_1 , maka pada sisi primer transformator arus (CT_2) akan mengalir arus I_2 .^[24]

Dalam keadaan tidak ada gangguan atau normal, arus yang mengalir ke relai pengaman sama dengan nol. Daerah pengamanan dari relai diferensial dibatasi antara dua buah CT. ^[24]Relai diferensial dalam kerja normal ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Rangkaian Relai Diferensial Normal^[24]

Agar relai diferensial tidak melakukan kerja saat kondisi normal (tidak terjadi gangguan), ada beberapa persyaratan berikut ^[24]:

1. CT_1 dan CT_2 memiliki rasio sedemikian rupa, sehingga $i_1 = i_2$ menggunakan penjumlahan vektor dengan perbedaan sudut 180° .
2. Sambungan dan polaritas CT_1 dan CT_2 harus benar.

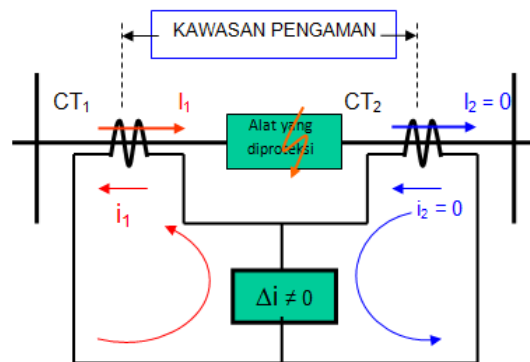
Nilai arus yang mengalir melalui relai diferensial menggunakan prinsip Hukum *Khirchoff* 1 :

“Arus total yang masuk melalui titik percabangan dalam rangkaian listrik sama dengan arus total yang keluar dari titik percabangan tersebut.”

Perbedaan nilai sudut fasa pada arus sangat mempengaruhi penjumlahan nilai arus yang mengalir melalui relai diferensial. Penjumlahan nilai arus di sini menggunakan penjumlahan vector, karena adanya perbedaan sudut fasa pada arus.^[24]

2.6.2 Kondisi jika Terjadi Gangguan di Daerah Pengamanan

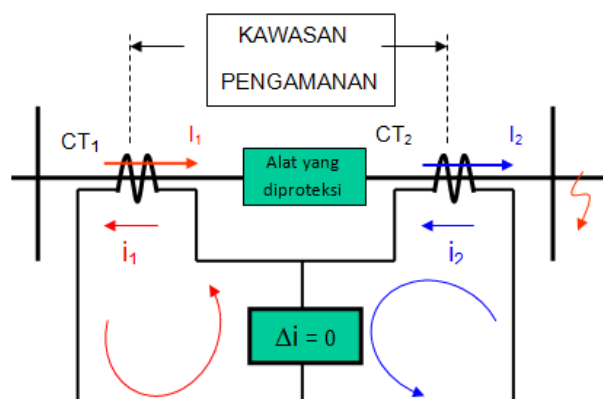
Jika suatu peralatan dipasang relai diferensial sebagai proteksi dan terjadi gangguan di daerah pengamanannya, maka relai diferensial akan bekerja. Saat CT_1 mengalir arus I_1 , maka pada CT_2 tidak ada arus yang mengalir ($I_2 = 0$), dikarenakan arus gangguan mengalir pada titik yang mengalami gangguan, sehingga pada CT_2 tidak ada arus yang mengalir. Akibatnya di sisi sekunder CT_2 tidak ada arus yang mengalir ($i_2 = 0$) yang mengakibatkan $i_1 \neq i_2$ ($\Delta i \neq 0$), sehingga relai diferensial bekerja. ^[24] Gambar 2.11 merupakan relai diferensial dengan gangguan internal.



Gambar 2.11 Rangkaian Relai Diferensial dengan Gangguan Internal^[24]

2.6.3 Kondisi jika Terjadi Gangguan di Luar Daerah Pengamanan

Apabila terjadi gangguan di luar daerah pengamanan, maka relai diferensial tidak bekerja. Saat sisi primer kedua CT dialiri arus I_1 dan I_2 dengan rasio CT_1 dan CT_2 yang sedemikian rupa, maka arus yang mengalir pada sekunder CT_1 dan CT_2 yang menuju relai memiliki nilai sama ($i_1 = i_2$) atau dengan kata lain tidak terjadi selisih arus yang mengalir pada relai sehingga relai tidak bekerja karena bila pada primer CT_1 dan CT_2 mengalir arus gangguan, arus pada sisi sekunder juga akan mengalir arus gangguan sebesar $i_1 = i_2$, sehingga relai diferensial tidak bekerja ($\Delta i = 0$).^[24] Gambar 2.12 merupakan relai diferensial dengan gangguan eksternal.



Gambar 2.12 Rangkaian Relai Diferensial dengan Gangguan Eksternal^[24]

2.7 Peralatan Simulasi

Peralatan simulasi adalah peralatan-peralatan yang digunakan untuk membuat alat simulator. Peralatan simulasi terdiri dari *hardware* simulator yang terintergrasi menjadi satu kesatuan.

2.7.1 Mikrokontroler Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560 adalah papan pengembangan mikrokontroler yang berbasis Arduino dengan menggunakan *chip* ATmega2560. *Board* ini memiliki pin I/O yang cukup banyak, sejumlah 54 buah digital I/O pin (15 pin diantaranya adalah PWM), 16 pin analog *input*, 4 pin UART (*serial port hardware*). Arduino Mega 2560 dilengkapi dengan sebuah *oscillator* 16 Mhz, sebuah *port* USB, *power jack* DC, ICSP *header*, dan tombol *reset*.^[25] Gambar 2.13 adalah *Arduino Mega 2560*.^[26]



Gambar 2.13 *Arduino Mega 2560*^[27]

Tabel 2.1 *Spesifikasi Arduino Mega 2560*^[26]

Mikrokontroler	: ATmega2560
Tegangan Operasi	: 5V
Input Voltage (disarankan)	: 7-12V
Input Voltage (limit)	: 6-20V
Pin Digital I/O	: 54 (yang 15 pin digunakan sebagai <i>output</i> PWM)
Pins Input Analog	: 16
Arus DC per pin I/O	: 40 mA
Arus DC untuk pin 3.3V	: 50 mA
Flash Memory	: 256 KB (8 KB digunakan untuk <i>bootloader</i>)

SRAM	: 8 KB
EEPROM	: 4 KB
<i>Clock Speed</i>	: 16 MHz

2.7.1.1 Power Supply

Arduino Mega 2560 diaktifkan menggunakan kabel *USB* atau dengan catu daya eksternal. *Arduino* dapat bekerja dengan sumber eksternal dari 7 sampai 20 V. Namun jika diberi tegangan kurang dari 7 V, maka tegangan pada pin *output* 5 V *Arduino* tidak akan sepenuhnya mengeluarkan 5 V, sehingga menjadi tidak stabil. Sedangkan jika diberi tegangan lebih dari 12 V, regulator tegangan (*voltage regulator*) akan mengalami panas berlebih dan dapat menimbulkan kerusakan pada *Arduino*. Untuk itu catu daya yang direkomendasikan adalah 7-12 V. Pin-pin tegangan pada papan *Arduino* ^[26] :

- VIN, pin untuk *input* tegangan ke *Arduino* jika memakai sumber eksternal.
- 5 V, pin *output* tegangan 5 V yang telah melalui regulator.
- 3.3 V, pin *output* tegangan 3.3 V yang telah melalui regulator.
- GND, pin *ground* atau negatif.

2.7.1.2 Memori

Arduino Mega 2560 mempunyai 256 KB *flash memory* dengan 8 KB digunakan untuk *bootloader*, 8 KB SRAM (*Static Random Access Memory*), dan 4 KB EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*).^[25]

2.7.1.3 Input dan Output

Setiap pin digital pada *Arduino Mega 2560* yang berjumlah 54 pin dapat digunakan sebagai *input* atau *ouput*, dengan menggunakan fungsi *pinMode()*,

digitalWrite(), dan *digitalRead()*. Setiap pin menerima atau mengirim arus sebesar 20 mA dengan arus maksimum 40 mA, namun dianjurkan untuk dihindari dan mempunyai tahanan *pull-up* internal berkisar antara 20-50 k Ω .^[26] Berikut adalah beberapa pin yang memiliki fungsi khusus^[26]:

- *Serial*: 0 (RX) dan 1 (TX); *Serial 1*: 19 (TX) dan 18 (RX); *Serial 2*: 17 (RX) dan 16 (TX); *Serial 3*: 15 (RX) dan 14 (TX), berfungsi untuk menerima (RX) dan mengirim (TX) data serial TTL.
- Interupsi Eksternal: pin 2 (*interrupt 0*), pin 3 (*interrupt 1*), pin 18 (*interrupt 5*), pin 19 (*interrupt 4*), pin 20 (*interrupt 3*), dan pin 21 (*interrupt 2*). Pin ini dapat dikonfigurasi untuk memicu sebuah interupsi pada nilai yang rendah, meningkat atau menurun, atau perubahan nilai.
- PWM: pin 0 sampai 13. Pin ini digunakan untuk *output* PWM dengan fungsi *analogWrite()*.
- *SPI*: pin 50 (MISO), 5 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS). Pin ini mendukung komunikasi *SPI* menggunakan *SPI library*.
- LED: pin 13. Pin ini dilengkapi dengan LED yang sudah tersedia pada papan *Arduino (built-in)*.
- I²C: pin 20 (SDA) dan 21 (SCL). Pin ini mendukung komunikasi TWI menggunakan *Wire library*.

Arduino Mega 2560 mempunyai 16 pin *input* analog yang masing-masing menyediakan resolusi 10 bit (1024 nilai yang berbeda). Secara otomatis pin ini dapat diukur/diatur mulai dari *ground* sampai 5 V, meskipun bisa juga merubah

titik jangkauan tertinggi menggunakan pin AREF dengan fungsi *analogReference()*.

2.7.1.4 Komunikasi

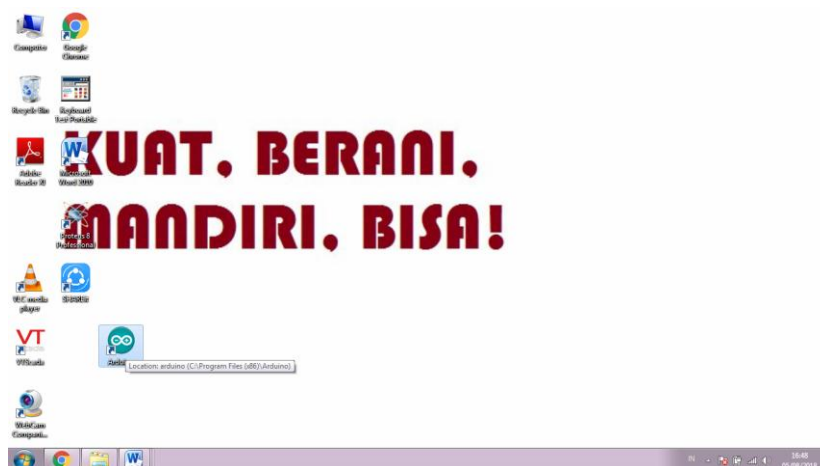
Arduino Mega 2560 mempunyai beberapa bagian komponen yang dipergunakan untuk berkomunikasi dengan komputer, *Arduino* lain, atau mikrokontroler lain. *ATmega 2560* menyediakan empat UART *hardware* untuk TTL (5V) komunikasi serial.

2.7.1.5 Pemrograman

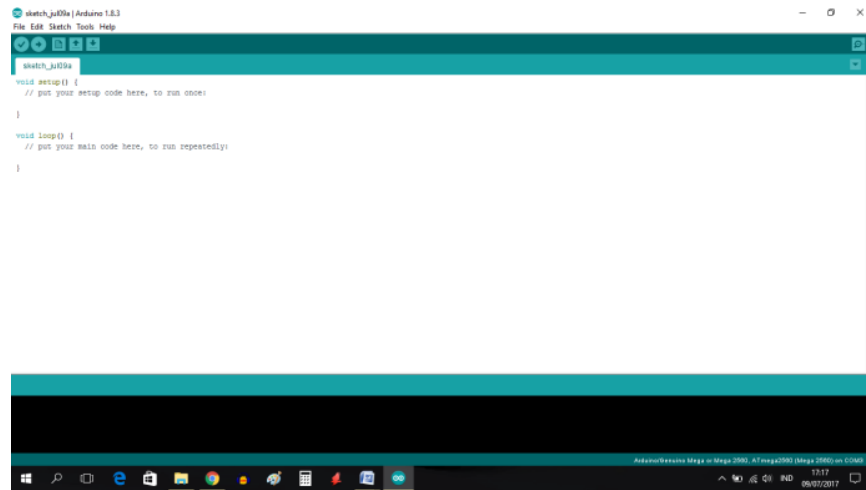
Pemrograman *Arduino Mega 2560* dapat dilakukan menggunakan aplikasi IDE (*Integrated Development Environment*) yang merupakan *software open source* dari *Arduino*. *Software* ini berfungsi untuk menulis program, meng-*compile* menjadi kode biner, dan meng-*upload* ke dalam memori mikrokontroler.

^[1] Berikut adalah cara menggunakan *software Arduino IDE*:

1. Jalankan *Arduino IDE* yang terpasang pada komputer. Gambar 2.14 dan 2.15 menunjukkan aplikasi *Arduino IDE* dan tampilan awalnya.



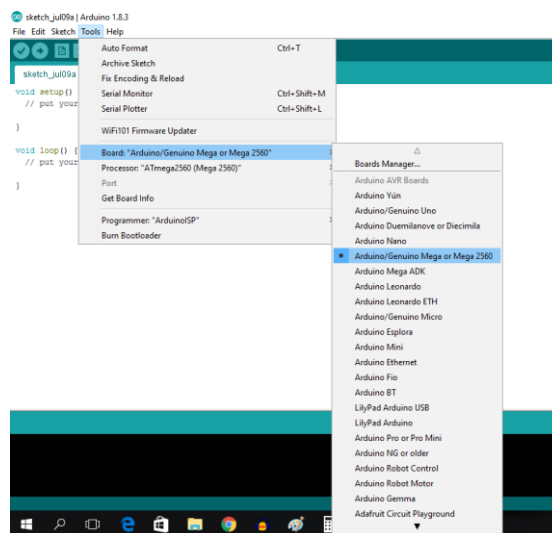
Gambar 2.14 Aplikasi *Arduino IDE*



Gambar 2.15 Tampilan Aplikasi Arduino IDE

2. Pilih menu **Tools** → **Board**

Pilih board “*Arduino Mega or Mega 2560*” karena di sini akan menggunakan *Arduino Mega 2560*. Gambar 2.16 menunjukkan tampilan saat pemilihan board “*Arduino Mega or Mega 2560*”.



Gambar 2.16 Memilih Board Arduino Mega 2560

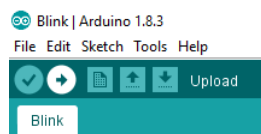
3. Tulis *sketch* (program) sesuai *project* yang dikerjakan, atau dapat memilih menu **File** → **Examples** → **Basics**, kemudian pilih *library* yang hendak dijalankan. Bagian *examples* berisi contoh-contoh *sketch* bawaan untuk

mempermudah *user* ketika memprogram *Arduino*. Gambar 2.17 merupakan contoh *sketch LED*.



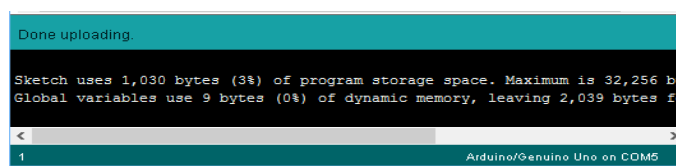
Gambar 2.17 Contoh Sketch LED

4. Klik tombol **Upload** pada *toolbar* untuk mengirim *sketch* tersebut ke *Arduino*. Dapat dilihat bahwa lampu LED RX pada *Arduino* akan berkedip-kedip ketika menerima program. Gambar 2.18 menunjukkan ikon *upload*.



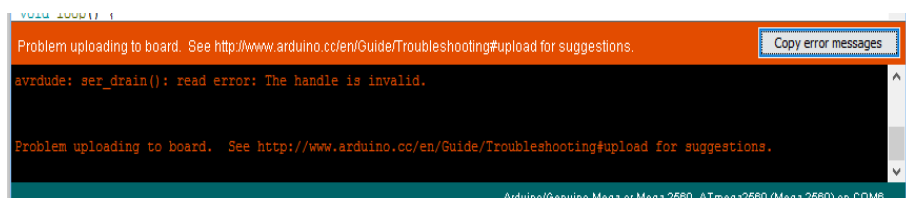
Gambar 2.18 Icon Upload

Jika program berhasil di-*upload*, maka akan muncul tampilan seperti gambar 2.19 di bawah.



Gambar 2.19 Program Berhasil Di-*upload*

Sebaliknya, jika terjadi kesalahan pada pemrograman dan pengiriman data gagal. Gambar 2.20 menunjukkan tampilan saat program gagal di-*upload*.



Gambar 2.20 Program Gagal Di-*upload*

2.7.2 Transformator

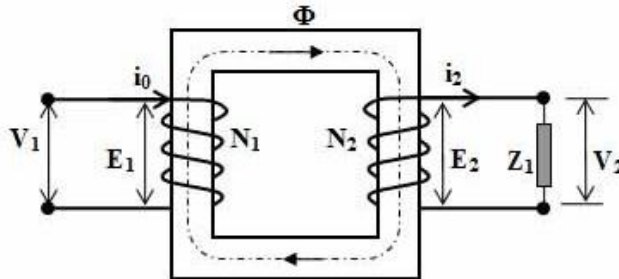
Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. ^[28] Gambar 2.21 adalah transformator daya kapasitas 1 A.



Gambar 2.21 Transformator daya 1A ^[29]

Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Tegangan masukan bolak-balik yang membentangi primer menimbulkan fluks magnet yang idealnya semua bersambung dengan lilitan sekunder. Fluks bolak-balik ini menginduksikan GGL dalam lilitan sekunder. Jika efisiensi sempurna,

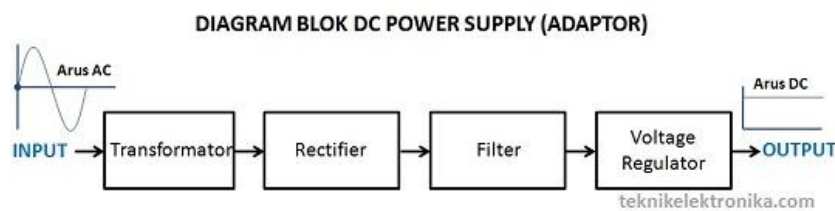
semua daya pada lilitan primer akan dilimpahkan ke lilitan sekunder. ^[30] Gambar 2.22 menunjukkan prinsip kerja transformator.



Gambar 2.22 Prinsip Kerja Transformator^[31]

2.7.3 Rangkaian Catu Daya

Catu daya atau sering disebut dengan *Power Supply* adalah perangkat elektronika yang berguna sebagai sumber daya untuk perangkat lain. Sumber DC seringkali dapat menjalankan peralatan-peralatan elektronika secara langsung, meskipun mungkin diperlukan beberapa cara untuk meregulasi dan menjaga suatu gaya gerak listrik agar tetap meskipun beban berubah-ubah. ^[32] Dibawah ini adalah *Diagram Blok DC Power Supply (Adaptor)* pada umumnya.

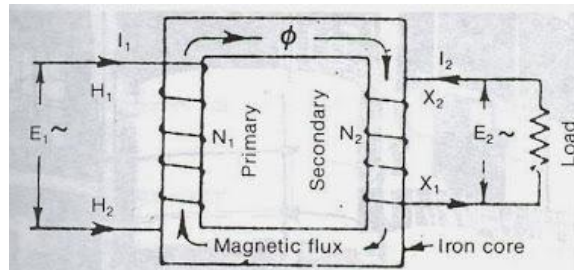


Gambar 2.23 Blok Diagram Catu Daya^[33]

1. Transformator

Transformator yang digunakan dalam rangkaian catu daya adalah jenis *step down*, yaitu transformator yang memiliki lilitan sekunder lebih sedikit daripada lilitan primer, sehingga berfungsi sebagai penurun tegangan. ^[30] Transformator *step down* digunakan untuk menurunkan tegangan AC dari

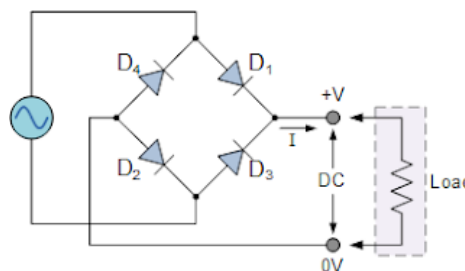
220 VAC ke 12 VAC. Gambar 2.24 menunjukkan prinsip kerja transformator *step down* 220V/12V.



Gambar 2.24 Prinsip Kerja Transformator Step Down 220V/12V^[34]

2. Penyearah (*Rectifier*)

Penyearah (*rectifier*) merupakan bagian dari catu daya yang berfungsi untuk mengubah tegangan bolak-balik atau AC menjadi tegangan searah atau DC. Komponen yang berfungsi sebagai penyearah adalah dioda. ^[35] Dalam pembuatan catu daya menggunakan rangkaian penyearah dioda *bridge*. Penyearah terdiri dari dioda *bridge*, yaitu empat buah dioda yang dirangkai membentuk sebuah jembatan untuk menyearahkan 1 gelombang penuh seperti yang ditunjukkan gambar . 2.25.

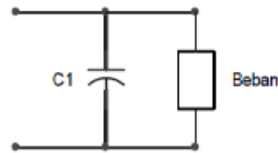


Gambar 2.25 Penyearah Gelombang (*Rectifier*)^[36]

3. Penyaring (*Filter*)

Keluaran tegangan arus searah yang dihasilkan oleh rangkaian penyearah bukanlah DC murni, sehingga dibutuhkan sebuah penyaring.

Rangkaian filter ini menggunakan kapasitor yang diletakkan melintasi terminal keluaran penyearah yang ditunjukkan gambar 2.26. ^[35]

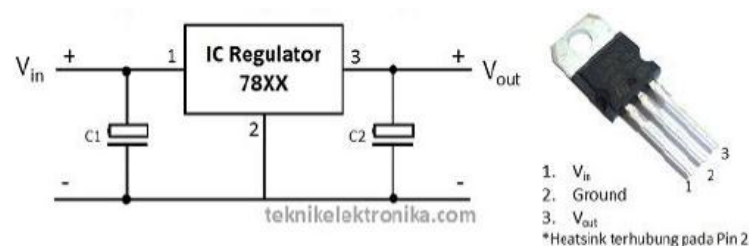


Gambar 2.26 Penyaring (*Filter*)^[35]

4. Regulator (Penstabil Tegangan)

Untuk menghasilkan tegangan dan arus DC (arus searah) yang tetap dan stabil, diperlukan *Voltage Regulator* yang berfungsi untuk mengatur tegangan sehingga tegangan *output* tidak dipengaruhi oleh suhu, arus beban dan juga tegangan input yang berasal *Output Filter*. ^[32]

Regulator tegangan yang sekarang banyak digunakan adalah dalam bentuk *IC*. *IC regulator* tegangan tetap memiliki seri 78XX untuk tegangan positif dan seri 79XX untuk tegangan negatif. Besar tegangan *output* IC seri 78XX dan 79XX ini dinyatakan pada dua angka terakhir serinya. Contoh *IC* 7812 adalah regulator tegangan positif dengan tegangan *output* +12 V, sedangkan *IC* 7912 adalah regulator tegangan negatif dengan tegangan *output* -12 V. ^[1] Penstabil tegangan dapat ditunjukkan pada Gambar 2.27



Gambar 2.27 Penstabil Tegangan (*Regulator*)^[32]

2.7.4 Sensor Arus ACS712

ACS712 merupakan suatu IC terpaket yang mana berguna sebagai sensor arus menggantikan transformator arus yang relatif besar dalam hal ukuran. Pada prinsipnya ACS712 sama dengan sensor *efek hall* lainnya yaitu dengan memanfaatkan medan magnetik disekitar arus kemudian dikonversi menjadi tegangan yang linier dengan perubahan arus. [37]

Tabel 2.2 Karakteristik ACS712^[38]

COMMON OPERATING CHARACTERISTICS¹ over full range of T_A , $C_F = 1$ nF, and $V_{CC} = 5$ V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
ELECTRICAL CHARACTERISTICS						
Supply Voltage	V_{CC}		4.5	5.0	5.5	V
Supply Current	I_{CC}	$V_{CC} = 5.0$ V, output open	–	10	13	mA
Output Capacitance Load	C_{LOAD}	V _{IOU} T to GND	–	–	10	nF
Output Resistive Load	R_{LOAD}	V _{IOU} T to GND	4.7	–	–	k Ω
Primary Conductor Resistance	$R_{PRIMARY}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$	–	1.2	–	m Ω
Rise Time	t_r	$I_P = I_P(\text{max})$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, $C_{OUT} = \text{open}$	–	3.5	–	μs
Frequency Bandwidth	f	–3 dB, $T_A = 25^\circ\text{C}$; I_P is 10 A peak-to-peak	–	80	–	kHz
Nonlinearity	E_{LIN}	Over full range of I_P	–	1.5	–	%
Symmetry	E_{SYM}	Over full range of I_P	98	100	102	%
Zero Current Output Voltage	$V_{IOUT(Q)}$	Bidirectional; $I_P = 0$ A, $T_A = 25^\circ\text{C}$	–	$V_{CC} \times 0.5$	–	V
Power-On Time	t_{PO}	Output reaches 90% of steady-state level, $T_J = 25^\circ\text{C}$, 20 A present on leadframe	–	35	–	μs
Magnetic Coupling ²			–	12	–	G/A
Internal Filter Resistance ³	$R_{F(INT)}$			1.7		k Ω

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient, T_A , and internal leadframe temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{J(\text{max})}$, is not exceeded.

²1 G = 0.1 mT.

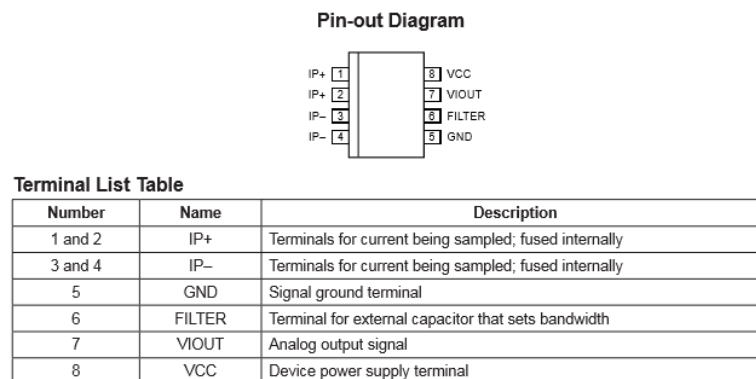
³ $R_{F(INT)}$ forms an RC circuit via the FILTER pin.

x05B PERFORMANCE CHARACTERISTICS¹ $T_A = -40^\circ\text{C}$ to 85°C , $C_F = 1$ nF, and $V_{CC} = 5$ V, unless otherwise specified

Characteristic	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Optimized Accuracy Range	I_P		–5	–	5	A
Sensitivity	Sens	Over full range of I_P , $T_A = 25^\circ\text{C}$	180	185	190	mV/A
Noise	$V_{NOISE(PP)}$	Peak-to-peak, $T_A = 25^\circ\text{C}$, 185 mV/A programmed Sensitivity, $C_F = 47$ nF, $C_{OUT} = \text{open}$, 2 kHz bandwidth	–	21	–	mV
Zero Current Output Slope	$\Delta V_{OUT(Q)}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	–	–0.26	–	mV/ $^\circ\text{C}$
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to 150°C	–	–0.08	–	mV/ $^\circ\text{C}$
Sensitivity Slope	ΔSens	$T_A = -40^\circ\text{C}$ to 25°C	–	0.054	–	mV/A/ $^\circ\text{C}$
		$T_A = 25^\circ\text{C}$ to 150°C	–	–0.008	–	mV/A/ $^\circ\text{C}$
Total Output Error ²	E_{TOT}	$I_P = \pm 5$ A, $T_A = 25^\circ\text{C}$	–	± 1.5	–	%

¹Device may be operated at higher primary current levels, I_P , and ambient temperatures, T_A , provided that the Maximum Junction Temperature, $T_{J(\text{max})}$, is not exceeded.

²Percentage of I_P , with $I_P = 5$ A. Output filtered.



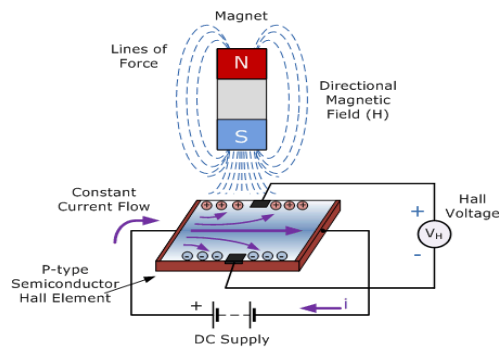
Gambar 2.28 *Pin-out Diagram ACS712*^[38]

Gambar 2.28 merupakan *pin-out diagram ACS712*. ACS712 menggunakan prinsip efek *Hall* mendeteksi arus yang mengalir melalui pin IP+ dan IP- dan memberikan keluaran berupa tegangan.^[1]

Pembacaan arus pada ACS712 diawali dengan peristiwa elektromagnetik berdasarkan Hukum *Faraday*. Pada hukum ini dijelaskan, bahwa arus listrik yang mengalir melalui suatu konduktor tertutup akan menimbulkan medan magnet yang kemudian perubahan medan magnet tersebut dapat menginduksikan arus ke konduktor lain.^[1] Tahap selanjutnya adalah efek *Hall*. Efek *Hall* merupakan kejadian di mana terdapatnya beda tegangan pada sebuah logam yang berada dalam medan magnet, ketika diberikan arus pada logam tersebut yang tegak lurus dengan medannya^[39].

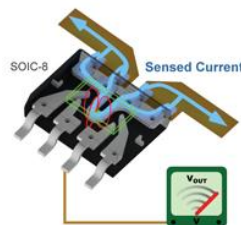
Ketika arus listrik (I) mengalir pada sebuah bahan logam dan logam tersebut memiliki medan magnet (B) yang tegak lurus dengan arus, maka pembawa muatan (*charge carrier*) yang bergerak pada logam akan mengalami pembelokan oleh medan magnet tersebut. Akibat dari proses itu akan terjadi penumpukan muatan pada sisi-sisi logam setelah beberapa saat. Penumpukan atau

pengumpulan muatan dapat menyebabkan sisi logam menjadi lebih elektropositif ataupun elektronegatif, tergantung pada pembawa muatannya. Perbedaan muatan di kedua sisi logam ini menimbulkan perbedaan potensial yang disebut sebagai Potensial *Hall* ^[40].



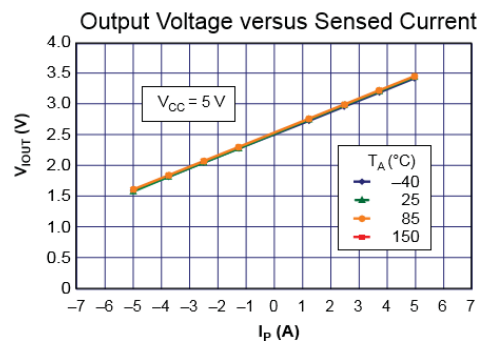
Gambar 2.29 Skema Efek Hall^[39]

Gambar 2.29 merupakan skema efek Hall. Pada ACS712 pin yang dialiri arus akan terhubung ke keping tembaga yang terhubung secara internal, sehingga arus akan banyak mengalir pada bagian ini. ACS712 memiliki sensor efek *Hall* yang diletakkan di sebelah keping tembaga, sehingga jika arus mengalir melalui keping tembaga dan menghasilkan medan magnet, medan magnet ini akan dideteksi oleh sensor efek *Hall* yang *output*-nya berupa tegangan sesuai dengan arus *input*. ^[1] Gambar 2.30 menunjukkan prinsip kerja ACS712.



Gambar 2.30 Prinsip Kerja ACS712^[38]

Karakteristik dari sensor ini adalah ketika tidak ada arus yang mengalir pada rangkaian maka keluaran sensor adalah setengah dari V_{cc} yaitu 2,5 V. Ketika arus mengalir dari pin IP+ ke IP-, maka keluaran akan $>2,5$ V, sedangkan ketika arus mengalir dari IP- ke IP+ maka keluaran akan $<2,5$ V. Gambar 2.31 di bawah adalah hubungan antara tegangan *output* dengan arus yang dideteksi sensor. ^[1]



Gambar 2.31 Hubungan Tegangan Output dengan Arus^[38]

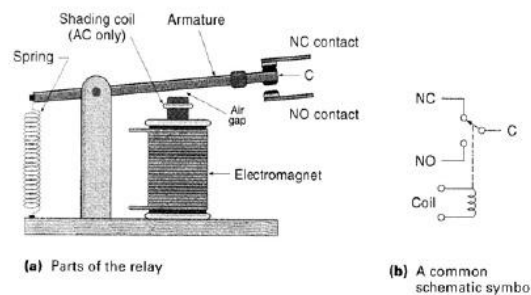
Karakteristik lain dari sensor arus ACS712 yaitu :

- Jalur sinyal analog yang rendah *noise*.
- *Bandwidth* 50 kHz.
- *Rise-time* 50 μs .
- Total *error* pada *output* sebesar 1,5% pada $T_A=25^\circ\text{C}$.
- Sensitivitas *output* adalah 185-66 mV/A.
- Tegangan *input* 5V.
- Tegangan *output* proporsional untuk arus DC maupun AC.
- Resistansi internal konduktor adalah 1,2 m Ω .

2.7.5 Relai 12 VDC

Relai adalah sebuah saklar yang dikendalikan oleh arus. Relai memiliki sebuah kumparan tegangan rendah yang dililitkan pada sebuah inti. Terdapat

sebuah armatur besi yang akan tertarik menuju inti apabila arus mengalir melewati kumparan. Armatur ini terpasang pada sebuah tuas berpegas. Ketika armatur tertarik menuju ini, kontak jalur bersama akan berubah posisinya dari kontak normal-tertutup ke kontak normal-terbuka. ^[41] Gambar 2.32 menunjukkan bagian-bagian dari sebuah relai.

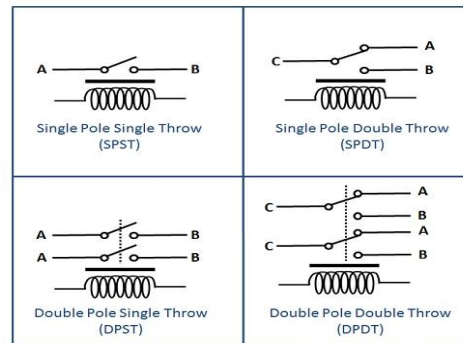


Gambar 2.32 Bagian-Bagian dari Relai^[42]

Cara kerja relai yaitu ketika kumparan dialiri arus listrik maka akan timbul gaya elektromagnet yang akan menarik *armature* berpegas, dan kontak akan menutup. Kontak dapat berupa kontak *normally open* (NO) maupun kontak *normally closed* (NC). Kontak NO berarti kondisi awal relai sebelum diaktifkan statusnya terbuka dan jika diberi *input* maka kontak akan menutup, sedangkan kontak NC berarti kondisi awal relai sebelum diaktifkan berstatus tertutup. ^[1]

Berdasarkan jumlah *pole* (kontak) dan jumlah *throw* (kondisi kontak) maka *relay* dapat digolongkan seperti pada gambar 2.33 :

1. *Single Pole Single Throw (SPST)*
2. *Single Pole Double Throw (SPDT)*
3. *Double Pole Single Throw (DPST)*
4. *Double Pole Double Throw (DPDT)*



Gambar 2.33 Jenis Relai Berdasarkan Pole dan Throw^[43]

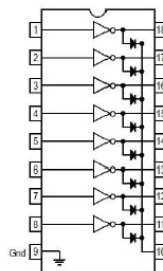
Gambar 2.34 di bawah menunjukkan gambar relai 12 VDC.



Gambar 2.34 Relai 12 VDC^[43]

2.7.6 Driver Relai IC ULN2803

ULN2803 merupakan salah satu IC yang mampu difungsikan sebagai *driver relay*. IC ini mempunyai 8 buah pasangan transistor *darlington npn*, dengan tegangan *output* maksimal 50 V dan arus setiap pin mencapai 500mA. ^[18].



Gambar 2.35 Pin-out Diagram ULN2803^[44]

Gambar 2.35 menunjukkan *pin-out diagram* ULN2803. ULN2803 mempunyai 18 pin dengan rincian pin 1-8 digunakan untuk menerima sinyal

tingkat rendah, pin 9 sebagai *ground*, pin 10 sebagai *Vcc*, dan pin 11-18 merupakan *output*.

2.7.7 Data Logger

Data logger (perekam data) adalah sebuah alat elektronik yang mencatat data dari waktu ke waktu baik yang terintegrasi dengan sensor dan instrumen di dalamnya maupun eksternal sensor dan instrumen atau secara singkat *data logger* adalah alat untuk melakukan *data logging*. Berikut bagian dan fungsi *data logger*.

[45]

1. Saluran Masukan (*input channel*)

Keluaran dari sensor dihubungkan pada saluran masukan pada *data logger*. Sebuah saluran terdiri dari rangkaian yang dirancang untuk menyalurkan sinyal dari sensor (umumnya tegangan atau arus) ke prosesor.

2. Analog Digital Converter (ADC)

Semua sinyal sensor, baik analog, digital dan SDI-12, harus dirubah dalam format biner dengan tujuan agar *data logger* dapat merekamnya.

3. *Microprocessor*/Mikrokontroler

Mikroprosesor pada *data logger* didesain untuk melakukan beberapa operasi aritmatika dan logika. Secara umum operasi mikroprosesor termasuk penambahan, pengurangan, membandingkan dua angka, memindah angka dari satu area ke yang lain.

4. *Memory*

Dua tipe memori yang digunakan pada *data logger* adalah:

a. RAM (*Random Access Memory*)

RAM tidak seperti RAM pada PC yang digunakan sebagai “*Workshop area*”- digunakan hanya pada saat bekerja, *data logger* dapat menggunakan RAM untuk menyimpan data (yang dibaca dari saluran masukan).

b. EEPROM (*Electrically Erasable & Programmable Read Only Memory*)

EEPROM (*Electrically Erasable & Programmable Read Only Memory*) dikembangkan untuk *data logger* pada akhir 1980-an EEPROM tidak memerlukan baterai cadangan.



Gambar 2.36 Jenis Memori Data Logger^[54]

2.7.8 Ethernet

Ethernet Shield adalah modul yang digunakan untuk mengkoneksikan Arduino dengan internet menggunakan kabel (Wired). *Ethernet Shield* bekerja dengan cara memberikan layanan IP pada arduino dan pc agar dapat terhubung ke internet. Cara menggunakan cukup mudah yaitu hanya dengan menghubungkan Arduino *Ethernet Shield* dengan *board* Arduino lalu akan disambungkan ke jaringan internet.



Gambar 2.37 Ethernet Shield^[54]